朱沛熠, 陈健乐, 周建弟, 等. 黄酒沉淀形成机理及其消除工艺研究进展 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(6): 472−484. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040170

ZHU Peiyi, CHEN Jianle, ZHOU Jiandi, et al. Progress in the Formation Mechanism of Huangjiu Precipitation and Its Elimination Process[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(6): 472−484. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040170

· 专题综述 ·

黄酒沉淀形成机理及其消除工艺研究进展

朱沛熠[1], 陈健乐[1], 周建弟[2], 兰　洋[2], 徐岳正[2], 潘琪锋[2], 叶兴乾[1], 田金虎[1,*]

（1.浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 浙江杭州 310058;
2.浙江古越龙山绍兴酒股份有限公司, 浙江绍兴 312000）

摘　要: 黄酒作为我国国酒因口感醇厚、富含蛋白质、多酚、碳水化合物等营养物质而备受青睐。然而黄酒在贮藏销售过程中不可避免的产生沉淀，进而影响了黄酒的市场接受度。当前黄酒沉淀问题已成为制约黄酒产业高质量发展的瓶颈。到目前为止，有关黄酒沉淀的形成机制、消减方法等多借鉴啤酒、葡萄酒、果汁饮料等的处理方式，缺乏针对性的处理方案。针对此，本文围绕着黄酒沉淀的分类、形成机理以及消除工艺进行系统总结。首先阐述了黄酒沉淀产生的潜在路径，然后总结了当前黄酒沉淀消减调控的常用技术，如过滤、絮凝沉降、酶解、杀菌方式等在调控黄酒沉淀上的应用。在此基础上，进一步提出通过对原料小麦进行基因编辑，从源头调控致沉淀关键蛋白来消减沉淀的可行性。最后指出未来通过系统揭示黄酒沉淀形成机理研究、优化工艺参数、整合新兴技术，实现黄酒加工全流程精准控制，是解决黄酒沉淀的可行方案。本文旨在为我国传统黄酒酿造体系的稳定性控制提供理论指导，进一步助力黄酒产业提质增效。

关键词: 黄酒, 沉淀分类, 沉淀机理, 消除工艺

中图分类号: TS262.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)06−0472−13

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040170

本文网刊:

Progress in the Formation Mechanism of Huangjiu Precipitation and Its Elimination Process

ZHU Peiyi[1], CHEN Jianle[1], ZHOU Jiandi[2], LAN Yang[2], XU Yuezheng[2], PAN Qifeng[2], YE Xingqian[1], TIAN Jinhu[1,*]

（1.College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;
2.Zhejiang Gu Yue Long Shan Shaoxing Wine Co., Ltd., Shaoxing 312000, China）

Abstract: Huangjiu, regarded as China's national alcoholic beverage, has been widely favored for its mellow taste and richness in nutrients such as proteins, polyphenols, and carbohydrates. However, the precipitation during storage and distribution has been found to negatively impact its market acceptance. At present, the issue of precipitation has become a bottleneck restricting the high-quality development of the Huangjiu industry. To date, the understanding of precipitation mechanisms and elimination process in Huangjiu has largely been derived from practices used in beer and wine production, resulting in a lack of targeted solutions specific to Huangjiu. Based on this, a systematic review is conducted in this paper on the classification, precipitation mechanisms, and elimination process of precipitation in Huangjiu. The potential pathways of precipitation formation in Huangjiu are first elucidated. Subsequently, the commonly used technologies for precipitation reduction and control in Huangjiu, such as filtration, flocculation and precipitation, enzymatic hydrolysis, and sterilization methods, are summarized, with a focus on their applications in controling precipitation. On this basis, the feasibility of reducing precipitation by regulating key precipitation-inducing proteins at the source through gene editing of wheat —the primary raw material— is further proposed. Finally, it is proposed that precipitation in Huangjiu can be

收稿日期: 2025−04−15

基金项目: 浙江省科技厅省地协同项目—黄酒沉淀控制关键技术研究与应用示范（2024SDXT001-6）。

作者简介: 朱沛熠（2001−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工技术, E-mail: 1121563060@qq.com。

*** 通信作者:** 田金虎（1988−）, 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 食品加工技术, E-mail: jinhutian@126.com。

effectively addressed through the systematic elucidation of its formation mechanisms, the optimization of processing parameters, and the integration of emerging technologies, thereby enabling precise control throughout the entire production process. This review aims to offer theoretical support for the stability control of the traditional Huangjiu brewing system in China, thereby facilitating the improvement of product quality and the high-efficiency development of the Huangjiu industry.

Key words: Huangjiu; precipitation classification; precipitation mechanism; elimination process

黄酒作为我国现存历史最悠久的发酵酒精饮料，其酿造技艺已被纳入国家级非物质文化遗产名录[1−2]。据国家标准 GB/T 13662-2018 黄酒[3] 的定义，黄酒通常是指以稻米、黍米、小米、玉米、小麦、水等为主要原料，经加曲或部分酶制剂、酵母等糖化发酵剂，再经过压榨、过滤、煎酒、存储、调制等步骤而制成的酒。按产品风格，黄酒可分为传统型、清爽型及特型黄酒。黄酒中富含碳水化合物、矿物质元素、多酚类化合物及多肽、氨基酸等生物活性组分，这些活性组分可通过多靶点作用路径(如相关信号通路激活、肠道菌群-免疫轴调节等)介导抗氧化应激、脂代谢稳态维持、免疫稳态调控等生理调节功能[4]。

尽管黄酒具备显著的品质优势与文化底蕴，其产业化进程却呈现出显著的动能转换迟滞。据中国酒业协会 2023 年行业报告指出，我国黄酒企业 2023 年一季度以来的业绩均出现回落，行业整体陷入增长瓶颈[5]。该困境的成因具有多维复杂性。首先，品类定位策略失当导致价值认知偏离[6]。其次，产品稳定性缺陷构成重要技术掣肘，在运输与贮藏过程中，黄酒受外部环境条件的变化，如温度波动、光照强度等影响，以及其内部化学与物理环境的动态变化，极易发生复杂的微观结构和成分转变，导致酒体出现混浊现象，慢慢聚集沉降于容器底部，形成明显沉淀[7]，这是导致当前消费者退货的主要原因。

沉淀问题同样存在于啤酒、葡萄酒等相关产业中。不同于主要消费市场在国内的黄酒，啤酒与葡萄酒作为全球产量大、消费广的酒类，其相关研究更为深入。目前普遍认为(除微生物污染导致的变质沉淀外)，啤酒与葡萄酒中的沉淀主要与蛋白质和多酚密切相关[8−9]。针对性地，业界已开发出多种沉淀消除工艺，如超声辅助酶解、固定化酶技术、多孔吸附材料、新型澄清剂及基因编辑技术等应用于葡萄酒、啤酒等酒精饮料的沉淀控制。这些方法在有效减少沉淀的同时，力求最大程度保留甚至改善酒体原有风味，并提升其稳定性[10−12]。基于此，本文拟借鉴其它类型酒与黄酒在沉淀调控领域的现有研究成果，系统解构黄酒贮藏期沉淀形成的潜在机制，梳理了现有沉淀消除技术的优缺点，并通过揭示黄酒沉淀形成的分子机制，提出基于多方案协同的黄酒沉淀调控策略，旨在突破黄酒产业“低端锁定”困局，推动其向高品质、高附加值方向发展。

1　黄酒沉淀的分类及特点

黄酒沉淀的形成，与其特殊的酿造工艺密切相关。传统黄酒采用糖化与发酵同时进行的双边发酵工艺，使得酒体中保留了丰富的菌体及复杂的化学成分，如蛋白质、多肽、多酚、多糖、糊精、矿物质和有机酸等。这些物质共同构成了黄酒的总固形物，即经高温烘干后残余物质的质量总量是反映黄酒感官的重要指标[13]。然而，总固形物包含了酒体中所有非挥发性物质的总和。而沉淀则是在特定条件下，由酒体中部分成分相互作用、聚集后形成的可见物质[14]。因此，虽然黄酒高固形物含量可能增加沉淀形成的潜在风险，但沉淀的实际产生是特定成分在多种环境因素协同作用下的物理化学变化结果，两者概念上存在本质区别。

尽管黄酒沉淀的类型多样，但从本质可归结为两类：生物沉淀和非生物沉淀(图 1)。正常黄酒中的沉淀通常以非生物沉淀为主，而变质黄酒中的沉淀则主要以生物沉淀为主。这是因为黄酒正常存储过程中出现的沉淀，往往对酒体风味品质无显著影响，只会影响产品外观[15]。黄酒非生物沉淀的形成与酿造工艺密切相关，酒体中保留了较多蛋白质、多肽、多酚、糊精和多糖等物质，这些物质在贮存过程中容易形成沉淀。沉淀的产生一定程度上反映了酿造工艺的纯正，使黄酒风味更加丰富。随着时间的推移，酒中物质能有更多时间进行反应和沉淀，通过观察沉淀的产生量，也能判断黄酒陈酿程度，获得高品质陈年黄酒[16−17]。而变质黄酒中的生物沉淀往往是由贮藏过程中腐败微生物污染引起的，伴有明显的发酸、发臭现象[18]。

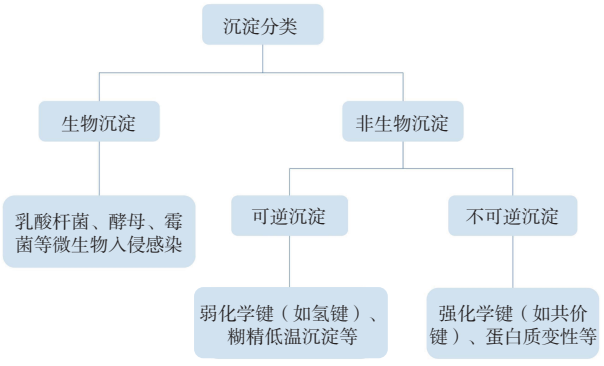


图 1　黄酒沉淀分类

Fig.1　Classification of Huangjiu precipitation

1.1　生物沉淀

在黄酒的酿造过程中，生物沉淀的主要成分为发酵结束后残留的霉菌、酵母菌和细菌及其代谢物的混合物。黄酒生物沉淀本质上是微生物生态失衡

的表型体现。虽然微生物是酿酒的基本要素，但某些种类的酵母和细菌在特定条件下会导致酒体浑浊、发酸、产生异味等。该现象的发生与黄酒的低酒精度，且生产方式相对开放，容易被污染有关。一般来说，霉菌主要负责糖化，乳酸菌代谢酸性物质，酵母菌则主导酒精发酵[19]。在 pH3.5~4.0 的适宜范围内，酵母菌和乳酸杆菌可维持相对稳定的动态平衡，外源细菌和霉菌的生长受到抑制[20]。然而，若在生产或运输环节中环境条件发生变化，则可能打破这一平衡，导致杂菌侵入并迅速繁殖，生成白色菌膜，伴随酒体酸败和异味的出现[21]。此外，生产环境不佳也会增加污染风险，特别是在装瓶等关键环节中可能发生一次或二次污染，引发后期生物沉淀[9]。某些微生物还可能通过原料携带进入生产系统。值得注意的是，部分发酵菌种及其代谢产物本身也可能破坏酒体稳定性。例如，布鲁氏酵母（*Brettanomyces bruxellensis*）在发酵过程中产生的挥发性酚类物质不仅影响酒体风味，其本身也易诱发沉淀的产生[22−23]。

1.2 非生物沉淀

黄酒非生物沉淀的形成是酒体内部复杂成分与外部环境协同作用的结果。从内在机制分析，蛋白质分子聚集行为（如疏水基团暴露）是主要诱因，同时多酚类物质的螯合作用、金属离子的电荷平衡效应、多糖的立体阻碍以及美拉德反应产物的共沉淀行为均参与其中[24]。这种多组分协同效应源于黄酒中多元组分的交互作用。外部环境因素（如氧气浓度升高、光照过强或机械振动）通过加速氧化反应和颗粒碰撞，破坏酒体的胶体稳定性，最终引发沉淀生成[25]。非生物沉淀又分为可逆与不可逆沉淀两种。可逆沉淀的显著特征是在 30 ℃ 左右加热时，因沉淀组分间弱分子作用力（如氢键、范德华力）断裂而重新溶解，呈现温度依赖性相变特性，此现象又被称为“冷混浊”。而不可逆沉淀则表现为即使在加热条件下，沉淀依然无法溶解，其稳定性源于共价键（如二硫键、醌类氧化产物）形成的刚性交联网络[26]。可逆沉淀一般被认为是不可逆沉淀的前体，两者之间虽然在分子大小、物理性质以及组成成分的相对含量上存在一定差异。但两类沉淀的基本化学组成具有高度一致性，均含有蛋白质、多酚类化合物、糖类和一定量的矿物质。可逆性沉淀在特定环境条件下，会通过氧化作用和分子间的进一步聚合作用，逐步形成更为复杂的分子结构，最终转化为不可逆沉淀。

2 沉淀形成机理

2.1 微生物腐败

黄酒的生物沉淀现象通常由微生物腐败导致。微生物导致腐败的机制多种多样，包括各种代谢活动，如气体、酸、醇、醛、酮、脂肪酸、硫组分和氨的产生，食物组分（如蛋白质）的酶降解，次级代谢产物（如色素）的产生，和微生物含量的直接影响等[27]。这种腐败不仅会导致黄酒风味的变化，还会导致杂菌增长，在酒体中形成生物沉淀。

导致黄酒生物性酸败，产生沉淀的微生物有许多，如酵母、醋酸菌、假单胞菌、乳酸菌和芽孢杆菌等[28]。传统上通常将黄酒的酸败分为两类：细菌生物膜酸败（醋酸酸败）和非细菌生物膜酸败（乳酸酸败）。其中，乳酸酸败出现的频率往往更高，对黄酒的损害也更大[29]。乳酸菌通过发酵碳水化合物产生乳酸，降低食品 pH，引发异味[30]。章银珠等[31] 通过传统分离培养从变质的陈化黄酒中分离筛选得到 5 株乳酸杆菌优势菌，毛青钟[32] 则通过使用一种特殊培养基，从酸败的陈年黄酒中分离出了 2 株的乳酸杆菌优势菌。此外，刘文容等[29] 从酸败黄酒中筛选出了具有较高的酒精耐受度的耐酸乳杆菌（*Lactobacillus acetotolerans*）和食果糖乳杆菌（*Lactobacillus fructivorans*）。罗雪等[33] 进一步研究发现，这两类乳杆菌在 20~30 ℃ 条件下生长能力极强，在 23% 的酒精度数下仍能生长，进一步证实该菌株是导致黄酒酸败，产生沉淀的关键微生物。而随着基因组测序技术的不断发展与更新[34]，也为揭示是否存在其他菌种或除乳酸菌外是否存在其他关键致沉淀微生物提供了有力支持。

此外，假单胞菌、酵母菌和霉菌在黄酒中的作用也不可忽视[35]，假单胞菌属会形成强大的生物膜，这是一种由多糖、多肽和细胞外核酸组成的高级结构，可抵抗一定的物理和化学压力，并最终形成明显沉淀[36]。而酵母菌虽然是黄酒发酵的主要参与者，但在特定条件下产生的二氧化碳和代谢产物会导致酒体出现沉淀或异味。它们在酸性、高糖环境中具有较强的耐性，一旦在成品黄酒中有残留，极易发生过度增殖，导致酒体中出现沉淀[37]。而霉菌腐败通常以菌丝体的形式表现，其生长需要氧气，因而多见于黄酒储存过程中氧气控制不当的情况。章银珠等[31] 在变质黄酒的优势菌中同样检测出了 4 株酵母以及 4 株霉菌。Hu 等[38] 进一步利用 PacBio SMRT 测序技术对不同酸败阶段的黄酒微生物群落结构进行分析，发现酸败后期微生物明显较多。随着最初被污染的微生物的乳酸代谢，酒精含量降低，酸度超过黄酒的正常范围，从而使原本受到抑制的微生物得以迅速繁殖，一些不常见的真菌丰度也显著增加，如黑曲霉（*Aspergillus niger*）、黑酵母（*Aureobasidium pullulans*）以及汉斯德巴氏酵母菌（*Debaryomyces Hansenii*）。

然而，目前普遍缺少对黄酒酸败过程中微生物群落变化与主要有害成分之间关系的探讨，同时有关于微生物代谢活动在酸败过程中的作用机制的研究也较少。此外，还缺乏有效、快速的酸败微生物和酸败程度参考指标，国家标准中仅仅对金黄色葡萄球菌（*Staphylococcus aureus*）以及沙门菌进行卫生控制[39]。未来需结合分子生物学和生物信息学技术，深入探究黄酒酸败微生物的组成及功能，为监测和控制

黄酒贮藏过程中的微生物污染提供有效的参考依据。

2.2　蛋白质与多酚的作用

黄酒中的蛋白质组分是诱发非生物沉淀的关键因素。谢广发等[40]通过对瓶装黄酒酒脚成分的系统分析，发现蛋白质在沉淀物中的质量占比超过 50%，总多酚占比为 2% 左右，这一数据直观揭示了蛋白质在黄酒沉淀形成过程中的重要影响。杨国军等[41]对不同储存年份的绍兴花雕酒中蛋白质的分布、含量及稳定性进行分析，发现随储存时间延长，总蛋白质含量会下降，而稳定性则会增加，进一步证明蛋白质是形成黄酒沉淀的重要因素。

齐小慧[42]通过基质辅助激光解吸电离飞行时间质谱对黄酒中的蛋白进行鉴定，发现来源于小麦的 α-淀粉酶抑制剂数量最多，有 11 个蛋白点，占总蛋白的 52%。这不仅是沉淀中的主要成分，同时也是酒体中的主要蛋白。通常来说，酿造过程对蛋白质含量的影响最大[43]，如果温度在糖化阶段保持在 48~52 ℃，黄酒中的总蛋白含量会减少，但有时会因为部分蛋白分解不完全，会形成具有多个结合位点的蛋白质，容易与多酚结合，从而导致沉淀现象的加剧。同时，王文蒙[44]的研究表明小麦中 α-淀粉酶抑制剂有很高的热和 pH 稳定性，在酿造过程中该蛋白质几乎不发生变化，但经过长时间的高温杀菌后，会发生蛋白质变性，从而导致后续沉淀的产生。

黄酒中富含的酚类化合物不仅是黄酒重要的风味物质，同时还会极大地影响黄酒的胶体稳定性。黄酒常见的酚类化合物包括阿魏酸、香草酸和对香豆酸等[45]，这些酚类化合物很容易转化为挥发性物质，如愈创木酚和 4-乙烯苯酚，从而影响酒体的风味稳定性[46]。酚类化合物对蛋白质的强吸引力则是导致黄酒沉淀出现的重要原因[47]。多酚类物质的特殊化学结构决定了其与蛋白质的强相互作用特性。这类化合物不仅具备优异的电子/氢原子供体能力。同时还具有芳香特性和与多个羟基共轭的特性，这使它们对蛋白质和氨基酸具有极高的反应活性。此外，多酚对水的低亲和力也使得它们能与蛋白质牢固结合[48]。酚类化合物的芳香环上通常有两个或三个羟基，这种结构易氧化生成醌类化合物，当它们与蛋白质中的氨基发生反应时，羰基会充当亲电物质形成席夫碱，或在蛋白质和酚类化合物之间发生迈克尔加成反应，从而形成共价键[49−50]。

非共价键结合作用比共价键弱，包括氢键、范德华力、疏水作用以及离子键，蛋白质和多酚的结合通常由多种键共同作用[51−52]。多酚的芳香环与蛋白质的疏水区域之间会产生疏水吸引力，使多酚与蛋白质结合。此外，酚类的羟基会与蛋白质的极性基团相互作用，产生多个氢键，稳定蛋白质-多酚复合物的结构。这不仅会影响蛋白质的结构，同时也会改变其功能性质[53−54]。一般来说，氢键和疏水相互作用主要参与蛋白质-多酚复合物的形成[55]。例如，阿魏酸会与酶蛋白通过氢键相结合[56]，槲皮素/芦丁与 β-乳球蛋白则通过疏水键和氢键协同作用[57]，这一特性可以促使黄酒中高含量的多酚与蛋白质相互结合，形成稳定复合物。需要指出的是，这类相互作用的模式主要受内外双重因素调控，包括外在因素（pH 和温度）和固有分子特性（多酚和蛋白质的化学结构和类型），共同决定了复合物的形成机制与稳定特性[58]。

酒中蛋白质与多酚的浓度比例对酒体稳定性的影响十分显著，其相互作用模型如图 2 所示[59]。通常认为蛋白质上有多个结合位点可以与多酚相结合，而多酚的结合位点较少[60]。当蛋白质相对过量时，大部分多酚与蛋白质形成二聚体，只有少量多酚会与蛋白质-多酚复合物聚合，产生交联，因此，形成颗粒较小，无法在酒液中造成沉淀现象。同样，当多酚含量相对较多时，蛋白质无法提供足够多的交联结合位点，也不容易形成大颗粒，酒液中不会有沉淀现象出现。只有当多酚含量与蛋白质中结合位点数相当时，才会大量交联，从而形成大颗粒物质，造成酒液出现沉淀。白少勇[61]的研究也进一步佐证了这种现象，随着多酚添加含量的上升，蛋白质沉淀去除率会呈现先上升后下降的趋势。这一发现为通过调控蛋白-多酚比例来改善黄酒稳定性提供了重要理论依据。此外，最初的蛋白质-多酚复合物之间的微弱结合力往往是氢键或疏水键，很容易重新断裂，这可能是冷混浊形成的主要原因。但经过加热处理后，它们的结合力往往会变为共价键，不再断裂，从而形成不可逆沉淀[12]。

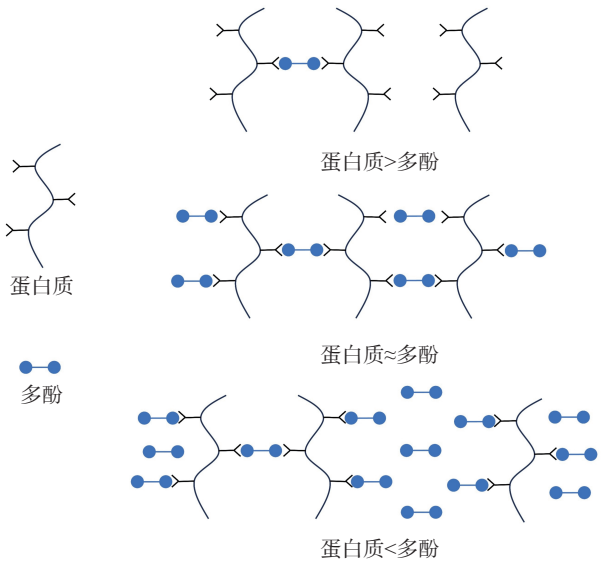


图 2　蛋白质-多酚相互作用模型[59]

Fig.2　Protein–polyphenol interaction model [59]

2.3　碳水化合物诱发的沉淀

黄酒体系中碳水化合物诱发的非生物沉淀现象虽在发生频率上远低于蛋白质与多酚主导的沉淀现象，但其作用机制呈现显著特异性。该过程源于糖化阶段未被充分水解的碳水化合物，当反应不彻底时，

它们就会以长链糊精的形式存在，无法被酵母利用。随着发酵程度的增加，酒精含量也随之增加，糊精的溶解度会进一步降低，从而出现一层灰色的薄纱，造成沉淀现象[9]。需要特别指出的是，糖化工艺参数控制对碳水化合物降解具有决定性影响，静置时间太短或温度不当均会导致淀粉降解不彻底、糊精残留率增加，从而导致沉淀现象[62]。

更复杂的作用机制体现在多糖与其他组分的协同效应上。麦曲和大米中的半纤维素由于糖化不彻底，也会进入酒体中，与蛋白质一起造成沉淀现象[63]。此外，单糖和多糖的存在也会进一步加强蛋白质-多酚体系分子间的交联作用[52]，从而增加黄酒沉淀的形成。这种三元复合物的形成往往以非共价作用为主，如向大豆分离蛋白-表没食子儿茶素没食子酸酯（EGCG）复合物中添加多糖，会使蛋白质二级结构中的 α-螺旋减少、β-转角增加，这表明多糖可通过静电作用介导蛋白质分子间的相互作用[64]。值得注意的是，这种蛋白质-多酚-多糖的三元复合物通常会形成紧密的结构，并且通过物理处理如光催化等，进一步形成更紧密的结构，从而提高其稳定性[65−66]。这种光敏特性也解释了黄酒在储存过程中光照可加速沉淀生成的原因。

但根据不同多糖与不同蛋白质、多酚的结构差异以及在体系中浓度的变化，多糖有时也能抑制沉淀的产生。这种作用机制取决于多酚与蛋白质和多糖的相对亲和力，如在牛血清白蛋白（BSA）/明胶-EGCG 体系中，多糖（果胶、黄原胶和瓜尔豆胶）会与 BSA/明胶竞争结合 EGCG，从而达到防止 BSA/明胶-EGCG 沉淀的形成[67]。因此可以尝试使用多糖澄清剂进行处理，达到消减控制黄酒沉淀的效果。然而酒中蛋白质和多酚种类繁多，可能会形成不同类型的蛋白质-多酚复合物，因此澄清剂的特异性还需进一步研究。

2.4 其他因素

除了上述主要因素外，黄酒沉淀的形成还涉及温度、氧气、金属离子以及光照等多因子的协同效应。热力学因素方面，长时间高温灭菌会引发蛋白质不可逆变性，导致疏水基团暴露，溶解度降低，从而形成沉淀。而低温贮藏时，蛋白质也易与多酚结合，产生沉淀现象[68]。酒体 pH 的酸性环境可促使蛋白质分子去折叠，暴露出与多酚的结合位点，显著提升其与多酚的结合概率，从而促进沉淀的形成[53]。同时，黄酒中的有机酸会与蛋白质发生静电作用，促进沉淀现象产生。氧化沉淀则是一个缓慢的过程，主要发生在贮藏过程中，含巯基蛋白质会被氧化聚合成大分子蛋白质，同时与多酚、多糖等物质发生氧化聚合[69]。而光照会进一步促进氧化反应的发生，破坏酒体稳定性[70]。此外，酒体中的离子强度对沉淀现象的产生有很大的影响。例如，铁离子容易和蛋白质、有机酸或者磷酸根等生成难溶盐，使得酒体产生沉淀[71]。这些金属往往来源于天然环境或者酿造过程，包括压榨机、泵以及储酒罐。此外，麦曲引入的草酸也极易与钙离子生成草酸钙沉淀。在酿造过程中使用硬水或处理不当的水冲洗过滤系统，会形成几乎不溶解的草酸钙。新酒通常由不同的大坛基酒勾兑而成，这会导致新酒中草酸与钙离子的平衡被打破，从而生成沉淀[72]。高温杀菌同样会促使草酸钙晶体的生成，而低温又会促使草酸钙的析出[73]。

3 沉淀消除工艺

在初步明晰黄酒沉淀形成机理的基础上，如何有效消除或抑制沉淀的生成是提升黄酒产品稳定性的关键环节。在黄酒酿造体系中，原料筛选与预处理是构成品质工程的物质基础。通过原料基因组学筛选技术，优选淀粉含量高的品种以及 α-淀粉酶活力高的麦曲原料，可以减少酒体中引入致浊蛋白的风险[18]。浸米工艺的精准控制对形成酸性浆水环境具有关键作用，通过乳酸菌代谢自然酸化（pH 调控），可有效抑制杂菌繁殖，降低酸败风险。在糖化阶段，基于单因素实验与响应面法优化的工艺参数（如酶解温度、时间），可显著提高糖化效率，从而减少糊精主导的沉淀现象[74]。

发酵过程的动态调控是黄酒品质管理的核心环节。前期通过发酵缸灭菌、优质酒母接种及低钙水源选择，减少草酸钙沉淀生成。发酵中通过筛选高活性乳酸菌与酵母菌，结合温度、通氧量等参数优化，维持微生物群落平衡。研究进一步指出，实时监测酸度、代谢产物（乙醇、乳酸）及微生物群落结构（如高通量测序技术），可提前预判酸败风险，实现从经验判断到生物信息预警的转变。例如，通过抑制醋酸菌等杂菌增殖，保障风味物质（酯类、氨基酸）的稳定积累[75−76]。

后处理与贮藏技术同样对黄酒稳定性具有决定性影响。压榨后采用多级过滤、添加硅藻土或蛋白酶处理，可高效去除蛋白质与多糖类沉淀物。巴氏杀菌则能灭活残留微生物，避免贮藏期酸败。包装与贮藏环节中，避光瓶体（如棕色玻璃）与恒温控制的应用，通过减少光氧化反应与胶体析出，可显著提升酒体稳定性[77−78]。目前，黄酒产业通常在后端使用过滤法、澄清剂、酶解法等来消除沉淀物质，达到消减控制的效果。然而，不同的处理方式对黄酒风味品质也会产生一定的影响。

3.1 过滤法

过滤是黄酒生产过程中最常用的去除沉淀手段之一，常见方法包括硅藻土过滤、膜过滤及冷冻过滤等。

3.1.1 硅藻土过滤　硅藻土因其多级孔隙结构，具有优异的吸附能力[79]。对发酵后的酒体使用硅藻土，不仅可以去除酵母菌，也可以吸附蛋白质、细菌等物质。通过选择不同类型的硅藻土并优化其添加量，可以有效辅助黄酒澄清，降低黄酒可溶性固形物的含

量。其中，在沉淀形成中起重要作用的多酚含量也会随硅藻土投加量的增加而减少。刘格等[80]使用6‰的硅藻土便使黄酒中的多酚含量下降了 9.7%。但该方法过滤效率相对较低，且滤液中存在混入硅藻土颗粒的风险[81−82]。程斐等[83]研究了硅藻土中金属元素含量对黄酒浑浊的影响，发现随硅藻土中铁、钠离子含量的增加，黄酒中沉淀的生成量显著上升。而通过助熔煅烧工艺对硅藻土进行预处理，可以有效去除其中的金属元素，从而减少过滤过程中引入的金属元素，减少沉淀的产生。但同时硅藻土对环境也有负面影响，处理废弃硅藻土较为麻烦[80]。针对这种情况，葡萄酒产业有相关研究表明，可以将废硅藻土用作混凝土中水泥或沙子的部分替代品，提高混凝土强度[84]。

3.1.2　膜过滤　膜过滤技术是一种通过使用不同孔径的膜对黄酒进行过滤，从而去除其中的悬浮粒子、大分子物质等，是目前在实际生产中应用较为广泛的技术。如图 3 所示，根据截留孔径的不同通常分为微滤、超滤、纳滤和反渗透，不同截留孔径所能达到的过滤效果也有所差别[85]。相较而言，微滤和超滤更适合应用于黄酒过滤工艺中。朱建航等[86]采用微滤技术对黄酒进行处理，结果表明在储存 4 个月后，黄酒的平均粒径仍然较低，聚合成大颗粒物质的前驱物质被有效去除，酒液稳定性得到了提高。超滤可以进一步去除容易产生沉淀的蛋白质，郭晓明等[87]通过超滤工艺处理黄酒，酒体稳定性也显著增强。此外，通过调节膜孔径大小，不仅能保证黄酒的澄清度和冷冻稳定性，还可在较大程度上保持其风味和感官品质[88]。王旨越等[89]通过改变超滤膜孔径，研究其对黄酒风味的影响，发现 50 kDa 膜处理的黄酒理化指标符合国家标准，挥发性成分和有机酸含量无显著变化，较好的保留黄酒的风味。值得注意的是，超滤还能够在无需升温的条件下去除酒液中的致病菌，同时避免主要香气成分的损失[90]。然而，针对刚酿造完成的黄酒，单独采用微滤或超滤工艺往往面临大颗粒物质含量高导致膜堵塞的问题。因此，将硅藻土过滤作为前处理工艺，再结合膜过滤技术，是当前较为可行的工艺组合。此外，过滤过程中温度、压力等工艺参数对过滤效率影响显著，需要在生产过程中进行优化与调整。与此同时，膜材料的清洗频率及清洗方法也是影响膜过滤效果和使用寿命的重要因素之一，如何实现高效、经济的膜清洗仍是黄酒加工过程中亟需解决的技术难题[91]。

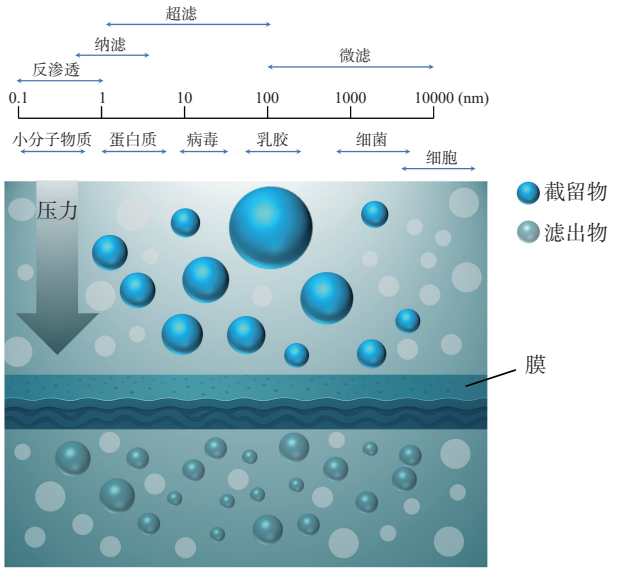


图 3　膜过滤原理图[85]

Fig.3　Principles of membrane filtration[85]

3.1.3　冷冻过滤　冷冻过滤作为提升黄酒澄清与稳定性的重要手段，主要通过降低酒液温度诱导胶体物质（如蛋白质-多酚复合物）发生相变和沉降，从而提高后续过滤效率。研究表明，黄酒中 β-球蛋白和醇溶蛋白在较高温度下易与水分子形成氢键从而保持良好的水溶性。而当温度降低时，这些氢键逐渐断裂，蛋白质结构发生构象改变，更倾向于与多酚类物质结合，进而生成不溶性沉淀物[92]。基于这一机制，在黄酒澄清前阶段进行冷冻处理，可促使部分蛋白质提前析出，减少其在成品酒贮存过程中因环境变化而导致的二次沉淀风险。此外，黄酒中还含有一定量高沸点的高级脂肪酸酯，这类物质在醇中具有较好的溶解性，但在水中的溶解度较低。当酒体温度和酒精度下降时，这些酯类物质的溶解性降低，易导致酒体失光、产生沉淀。同时，某些醇、酸、醛类物质在低温下也易析出形成乳白色沉淀[93]。通过冷冻处理并结合后续精滤工艺，不仅可以有效去除上述不稳定组分，还可改善酒体口感，使其更加柔和、清爽与协调。已有研究表明，采用快速冷冻工艺可加速黄酒中不稳定组分的析出，同时降低风味活性物质的损失，使酒精度、总糖及氨基酸态氮等关键指标更加稳定[94]。冷冻处理还能够减轻酒体过甜和过苦的味道，有效改善酒体的酸味，保留核心香气，使风味更加和谐平衡[95]。但需注意的是，该工艺对温控精度和能耗条件较为敏感，且不同类型黄酒在冷冻处理过程中对温度与时间的响应存在差异，这种差异最终会影响酒体风味和稳定性，增加了其在工业化推广过程中的经济性与普适性难度。因此，冷冻处理技术的实际应用仍需结合产品类型、工艺特点及目标品质，在生产实践中深入探讨其优化路径与适用范围。

3.2　絮凝沉淀法

絮凝沉淀法是通过向黄酒中加入吸附澄清剂，通过物理或化学方法去除液体中悬浮颗粒、杂质或沉淀，从而达到澄清的效果。其核心在于利用澄清剂与沉淀组分（蛋白质、多酚及金属离子复合物）间的分子识别与多尺度互作（如静电吸引、疏水缔合及配位键合），诱导形成可沉降絮体。当前技术体系涵盖天然高分子、合成聚合物及生物基材料等澄清剂，其作用效能与适用性需结合黄酒复杂基质特性进行系统性解析。目前常用的澄清剂包括单宁、交联聚

乙烯吡咯烷酮(PVPP)、硅胶、壳聚糖、明胶、植酸等[96]。

樊世英等[97] 研究不同澄清剂对黄酒沉淀蛋白的去除效果,发现硅胶、单宁都能够吸附沉淀蛋白,其中单宁的效果最好,这可能是因为单宁可通过酚羟基与蛋白质疏水区域的氢键网络形成选择性吸附,从而消除沉淀前驱物质,延缓沉淀的产生。然而,单宁氧化缩合衍生物可能导致酒体色泽劣变,且其剂量-感官响应阈值较窄,过量使用易引发涩感残留。与之相比,植酸可以通过磷酸基团与金属离子(Fe^{3+}、Cu^{2+})的强螯合作用,阻断金属催化氧化路径,同时促进脂质-蛋白质复合物的协同絮凝。研究表明,在一定浓度阈值下(如 0.04%),植酸可同步提升酒体稳定性和风味复杂度[98]。

然而,针对黄酒出现沉淀成因的多源性(如蛋白质变性、多酚氧化聚合),单一澄清剂往往难以实现理想的澄清效果,因此复合澄清剂的应用愈发重要。例如可以采用明胶-皂土法,通过粒子间不同电荷的吸附沉降作用,达到澄清的目的。但这种方法通常会改变酒体的色泽与风味,且残留氨基化合物易与还原糖发生美拉德反应,导致色泽与风味进一步偏移[7]。PVPP-硅胶联用则体现出互补优势。PVPP 因其分子结构中富含酰胺键,可与多酚类化合物中的羟基形成特异性结合;而硅胶可以通过表面硅羟基基团吸附蛋白。目前,该技术虽在啤酒工业成功应用,但在黄酒中的应用研究仍较少,尚需进一步探索和验证[99]。

此外,新型澄清剂的开发也为提升黄酒品质提供了新的研究方向。近年研究聚焦于可再生资源衍生的功能性多糖(如果胶、葡聚糖)及植物提取物,其通过三维网状结构包埋沉淀粒子并调节 Zeta 电位,兼具浊度控制与风味修饰功能。例如,来源于葡萄酒副产物的多糖类物质已被证实可作为澄清剂使用,不仅能够提高酒体稳定性,还能调节酒液中的挥发性成分,且无毒无害,兼具环境友好性与经济价值[100]。

尽管絮凝沉淀法在黄酒澄清中展现出显著的应用潜力,其技术体系仍存在若干亟待突破的瓶颈。现有澄清剂对复杂沉淀组分的选择性吸附机制尚未完全解析,复合体系的协同效应缺乏定量化模型支撑;澄清过程中絮凝物形成与沉降的动态行为表征技术不足,难以实现工艺参数的精准调控。未来研究需深度融合计算模拟,开发实时在线监测与自适应调控系统,并加速可降解新型材料的创新应用,推动黄酒澄清技术向高效、精准、可持续方向跨越式发展。

3.3 酶解法

目前许多研究表明黄酒沉淀本质源于高分子量蛋白质的胶体稳定性丧失。因此,酶解法通过靶向降解疏水性蛋白结构域,调控其溶解度,是打破胶体平衡、抑制沉淀形成的有效策略[101]。尽管该技术在葡萄酒与啤酒工业中已建立成熟应用体系,但黄酒复杂基质对酶活性的抑制效应及产物反馈机制尚未明晰,导致现有研究多聚焦于提高原料利用率和出酒率,而针对酒体稳定性的系统优化仍处于探索阶段。

赖樱花等[102] 采用酸性蛋白酶处理黄酒,发现其可以通过切割氨基酸残基,降低蛋白质疏水聚集倾向,从而提高酒的稳定性,但整体效果并不理想,且添加过量时反而会导致稳定性下降。另外高温杀菌会导致酶变性,反而加剧沉淀产生。为此,赖敏辉等[15] 引入 Mazyme LP 蛋白酶,灭菌后再进行过滤,其浊度较对照组降低了 39.02%,显著提升了酒体稳定性。此外,具有良好加工性能且可反复使用的固定化酶技术,也可以减少酶残留,提高酶解效率[103]。例如,Kharazmi 等[104] 构建了功能化磁性纳米颗粒载体固定木聚糖酶和果胶酶,在果汁澄清体系中,不仅显著降低了果汁浊度,且在经过 9 次重复使用后,仍保持了 64% 以上的初始酶活性。这也从侧面反映载体表面功能化(如疏水涂层)可能减弱黄酒中物质对酶活性的不可逆吸附,为黄酒连续化澄清提供新路径。同时,酶对于酒体的风味变化也有着一定影响。如 Paup 等[105] 发现随着陈酿时间的增加,果胶酶的存在会增加葡萄酒的特定香气。糖苷酶也可以水解非挥发性糖苷前体,从而提高酒体的香味化合物浓度,改善酒体感官特征。然而,对蛋白质过度酶解可能会产生大量的苦味氨基酸,导致酒体口感失衡。加上不同酶对于环境的适应性有所差别,在黄酒中易失活。因此,选择何种酶进行针对性处理是获得高品质黄酒的难题。

综上所述,尽管酶法调控在黄酒沉淀控制中展现出精准靶向性与环境友好优势,其技术体系仍面临多重挑战。不同酶在黄酒复杂体系中的适用性有待进一步研究。此外,酶解产物对黄酒风味产生的影响机制尚未明晰,缺乏系统性评估。同时固定化酶技术在实际生产中面临抗干扰性、重复利用性差,以及规模化生产成本较高等问题。未来研究需深度融合计算酶学、合成生物学,充分考虑不同酶制剂的最适温度、活性条件及其对工艺参数变化的敏感性。在实际应用前,通过系统的预实验确定最佳工艺条件,以减少潜在风险,实现黄酒沉淀控制从单一功效导向向多目标协同优化的跨越,为传统黄酒品质提升提供创新理论指导。

3.4 杀菌方式

当前黄酒工业化生产中普遍采用的热杀菌工艺通常设定在 80 ℃ 以上,维持数十分钟的热处理周期,继以渐进式降温流程[106]。然而,从食品工艺学角度深入分析,黄酒的 pH 较低、酒精度较高,已构成天然的微生物屏障。传统热杀菌工艺在此应用场景中可能存在过度处理倾向,其引发的蛋白质热变性不仅导致酒体胶体体系失稳,更可能在长期贮藏过程中通过疏水相互作用及二硫键重排引发持续的蛋白质-多酚复合物聚集,形成不可逆混浊沉淀。同时,杀菌温度对酒体的风味影响十分显著。在 60~65 ℃ 时,酒

质无明显变化，随杀菌温度的升高，当超过 80 ℃ 时，黄酒风味显著下降[107]。因此，采用非热杀菌工艺或短时高温瞬时杀菌技术有望在保证杀菌效果的同时，减少沉淀的产生，并改善风味特征。例如，脉冲强光杀菌利用紫外线至红外线区域的光谱波长的强脉冲和短脉冲，可以瞬时强效的杀灭微生物，目前在果汁的杀菌中已有应用，不仅能够有效灭活腐败酶和微生物，而且对生物活性化合物的破坏较小，显著提高了产品的稳定性，并保留其感官特性[108]。此外，采用热超声联用杀菌技术处理仙人掌梨汁，不仅显著减少了果汁中的沉淀物和固形物含量，还表现出优异的杀菌效果，从而延长了果汁的保质期[109]。脉冲电场与高压处理也被证明是有效的葡萄酒巴氏杀菌技术，可以灭活主要的葡萄酒腐败酵母，同时保留葡萄酒的特征风味和香气[110]。然而，尽管非热杀菌技术在果汁等液态食品体系已取得显著进展，但在黄酒复杂基质中的技术适配性仍需进一步验证。

3.5　品种改良

除了上述工艺上的调控外，基于分子定向调控的品种改良策略为传统酿造行业的技术革新提供了解决方案。以啤酒工业的生物稳定机制研究为例，通过外源关键蛋白的靶向性添加实验，在分子水平证实了特定蛋白家族敲除对沉淀形成的抑制作用，这为通过遗传手段调控内源蛋白表达提供了重要理论依据[111]。值得关注的是，随着基因编辑技术（如 CRISPR-Cas9）的迅速发展与应用，针对性地调控作物基因已成为实现品种改良的重要手段。近年研究证实，通过靶向敲除赋予作物不良性状的关键基因，不仅能显著提高谷类作物的抗逆性，还可有效降低其中致浊蛋白的表达水平[112]。在黄酒沉淀形成领域，Xie 等[113] 利用 MALDI-TOF MS 系统解析了沉淀复合物的核心组分，发现来源于小麦的 α-淀粉酶抑制剂是导致酒体出现沉淀的关键蛋白。基于此，通过基因编辑工具定向敲除目标蛋白的编码基因，如小麦中表达 α-淀粉酶抑制剂的特定基因，从而减少从麦曲中引入的沉淀蛋白，同时引入人工设计的调控元件实现关键代谢节点的动态平衡，有望从源头控制沉淀蛋白的产生，从而提高黄酒的澄清度和稳定性。这一研究方向为解决黄酒沉淀问题提供了新的思路和技术路径，但仍需深入系统的研究与实践来进一步验证。

3.6　其他方法

针对黄酒中沉淀的关键物质还可以使用新型材料进行分离固定。例如，磁性纳米粒子已被用于从反应混合物中分离产物或固定化酶，以及分离细胞和微生物[114]。通过对纳米粒子进行适当的表面改性，可使其成为黄酒相关蛋白的附着点，从而方便通过外部磁力将其收集起来，快速、有选择性地去除黄酒的致浊蛋白，减少对酒体风味的影响。Mierczynska 等[115] 对磁性纳米粒子进行丙烯酸涂层处理，并用其处理葡萄酒，发现这种功能化的磁性纳米粒子不仅能选择性的捕获和去除葡萄酒中的致浊蛋白-病程相关蛋白，同时酒中的酚类物质含量并没有发生改变，这一发现为黄酒沉淀的消减控制提供了新思路，可以将其应用至黄酒体系。针对已鉴定的燕麦类蛋白和二聚 α-淀粉酶抑制剂等致浊组分，通过调控纳米颗粒表面电荷密度（如引入氨基或羧基官能团），使其等电点与靶蛋白相匹配，从而增强选择性吸附能力。尽管磁性纳米分离技术在黄酒澄清中展现出显著优势，但其实际应用仍面临多重挑战，需要进一步研究。

4　总结与展望

本文系统阐明了黄酒沉淀形成的多元化分子机制，明确区分了生物沉淀与非生物沉淀形成的差异。非生物沉淀通常以蛋白质-多酚复合物为核心，通过疏水作用、氢键及氧化聚合形成三维网络结构，并受温度波动、金属离子（如铁、钙）及光照等多因素协同影响。在消除工艺方面，膜过滤技术可高效截留致浊大分子；复合澄清剂通过吸附作用，有效降低黄酒中多酚和蛋白质的含量，从而减少沉淀生成；固定化酶技术则展现了良好的沉淀控制潜力，且对酒体风味影响较小。此外，非热杀菌技术（如脉冲光、超声）的应用为减少热敏性成分变性提供了新思路。源头控制层面，基因编辑技术可通过靶向调控原料中致浊蛋白（如燕麦类蛋白、二聚 α-淀粉酶抑制剂）的表达，降低沉淀形成的风险，为提升黄酒稳定性开辟了新的研究路径。

尽管当前取得了一定研究进展，但在实际生产过程中仍面临诸多挑战。首先沉淀形成的动态过程尚不清晰，形成机制研究多停留在现象描述层面，致使已有模型难以有效指导生产实践。发酵工艺的差异会导致蛋白质、多酚、金属离子等潜在致沉组分含量波动。澄清剂对黄酒特征风味物质存在一定的非选择性吸附。储存条件如温度与光照等变化会诱导沉淀加速形成。基于此，在生产过程中可以调控发酵参数，稳定易发生反应的蛋白质、多酚等成分，延缓沉淀产生。同时，优化澄清剂配比与使用时间，减少对香气物质的吸附。在运输过程中，避免高温与光照，对高端产品可以使用冷链运输，降低沉淀产生的风险。

此外，基因编辑技术目前仍处于实验探索阶段，实际应用尚需结合原料品种改良开展系统性验证与评价。未来可结合多组学技术系统探明黄酒沉淀形成与转化过程，全面揭示沉淀形成的本质机理。同时加快包括固定化酶、非热杀菌、基因编辑等高新技术在黄酒产业的集成应用，基于沉淀形成机制，对黄酒沉淀进行针对性处理，从原料选育、发酵工艺优化到后处理手段，实现全流程质量控制。如利用纳米材料设计多级孔结构的“纳米捕获器”，实现对特定致浊颗粒（如蛋白-多酚复合物）的靶向去除；通过合成生物学手段重构酵母代谢路径，诱导其分泌特定蛋白酶，实现沉淀的同步降解。综上所述，沉淀问题的解

决应结合理论研究与实际工艺数据分析，通过技术与工艺的双重突破，推动黄酒产品的稳定性提升与高端化发展，最终增强其在国内外市场的竞争力。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 马琳娜, 单铭磊. “非遗”视阈下黄酒借鉴葡萄酒侍酒文化研究[J]. 国际公关, 2022(22): 167−169. [MA Linna, SHAN Minglei. Study on yellow rice wine learning from wine waiter culture from the perspective of “intangible heritage”[J]. PR Magazine, 2022(22): 167−169.]

[2] 茹拥政. 毛青钟. 用科技赋能黄酒发展[J]. 中国酒, 2023(10): 49. [RU Y Z. MAO Q Z. Empowering Huangjiu development with technology[J]. China Wine, 2023(10): 49.]

[3] 国家市场监督管理总局 国家标准化管理委员会. GB/T 13662—2018 黄酒[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018. [Standardization Administration of the People’s Republic of China. GB/T 13662 —2018 Huangjiu[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.]

[4] 周建弟, 赖敏辉, 应维茂, 等. 黄酒功能性成分与保健功能研究进展[J]. 酿酒, 2021, 48(5): 24−29. [ZHOU Jiandi, LAI Minhui, YING Weimao, et al. Progress in the study of functional components and health functions of Huangjiu[J]. Liquor Making, 2021, 48(5): 24−29.]

[5] 许雅, 周丰婕. 新媒体环境下黄酒产业化发展探究[J]. 酒·饮料技术装备, 2023(5): 74−79. [XU Ya, ZHOU Fengjie. Exploring the industrialization of Huangjiu in the new media environment[J]. Brew & Beverage Technology and Equipment, 2023(5): 74−79.]

[6] 李振江, 邓兴. 后疫情时代黄酒行业观察[J]. 食品界, 2024(3): 46−48. [LI Zhenjiang, DENG Xing. Observation on yellow rice wine industry in post-epidemic era[J]. Food Industry, 2024(3): 46−48.]

[7] 丁关海, 周建弟. 黄酒中非生物性沉淀的成分及其解决方法[J]. 中国酿造, 2003, 22(1): 24−25,28. [DING Guanhai, ZHOU Jiandi. Composition analysis and prevention method of non-biological deposit in rice wine[J]. China Brewing, 2003, 22(1): 24−25,28.]

[8] ALBUQUERQUE W, SEIDEL L, ZORN H, et al. Haze formation and the challenges for peptidases in wine protein fining[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(48): 14402−14414.

[9] KAHLE E M, ZARNKOW M, JACOB F. Beer turbidity part 1: A review of factors and solutions[J]. Journal of the American Society of Brewing Chemists, 2021, 79(2): 99−114.

[10] SILVA-BARBIERI D, SALAZAR F N, LÓPEZ F, et al. Advances in white wine protein stabilization technologies[J]. Molecules, 2022, 27(4): 1251.

[11] ROMANINI E, McRAE J M, BILOGREVIC E, et al. Use of grape seeds to reduce haze formation in white wines[J]. Food Chemistry, 2021, 341: 128250.

[12] WANG Yin, YE Lingzhen. Haze in beer: Its formation and alleviating strategies, from a protein–polyphenol complex angle[J]. Foods, 2021, 10(12): 3114.

[13] 樊阿萍, 周建弟, 胡燕讷, 等. 基于卤素水分仪的黄酒总固形物快速检测方法研究[J]. 酿酒, 2019, 46(6): 86−88. [FAN Aping, ZHOU Jiandi, HU Yanne, et al. Study on rapid detection method of total solids in Huangjiu based on halogen moisture meter[J]. Liquor Making, 2019, 46(6): 86−88.]

[14] 孙国昌. 谈黄酒沉淀与质量[J]. 酿酒科技, 2002(2): 68. [SUN Guochang. Talking about Huangjiu sedimentation and quality[J]. Liquor-Making Science and Technology, 2002(2): 68.]

[15] 赖敏辉, 周建弟, 孙大庆, 等. Mazyme LP 蛋白酶处理对黄酒沉淀的影响[J]. 酿酒科技, 2024(4): 25−28. [LAI Minhui, ZHOU Jiandi, SUN Daqing, et al. Effect of Mazyme LP protease treatment on the precipitation of Huangjiu[J]. Liquor-Making Science & Technology, 2024(4): 25−28.]

[16] 谢广发, 陆健, 孙军勇, 等. 黄酒非生物稳定性的预测模型[J]. 食品科学, 2020(5): 31−38. [XIE Guangfa, LU Jian, SUN Junyong, et al. Predictive modelling of the abiotic stability of Huangjiu[J]. Food Science, 2020(5): 31−38.]

[17] KIM D, PARK S E, KIM E J, et al. Effects of sediment and temperature on the long-term aging process of rice wine: Microbial and metabolic insights[J]. Food Research International, 2023, 174: 113604.

[18] 李敏, 韩惠敏, 耿敬章, 等. 黄酒的混浊沉淀及其控制研究进展[J]. 酿酒, 2019, 46(2): 31−35. [LI Min, HAN Huimin, GENG Jingzhang, et al. Advances in the study of turbid precipitation of Huangjiu and its control[J]. Liquor Making, 2019, 46(2): 31−35.]

[19] CHEN Xiaodie, SONG Chuan, ZHAO Jian, et al. Application of strain selection technology in alcoholic beverages: A review[J]. Foods, 2024, 13(9): 1396.

[20] 毛青钟. 黄酒酿造理论创新综述[J]. 酿酒, 2018, 45(6): 33−35. [MAO Qingzhong. An overview of theoretical innovations in yellow wine brewing[J]. Liquor Making, 2018, 45(6): 33−35.]

[21] 蒋佳佳, 张茜莹, 陆进舟, 等. 黄酒酸败微生物的研究进展[J]. 南方农业, 2020, 14(12): 123−124. [JIANG J J, ZHANG X Y, LU J Z, et al. Progress in the study of microorganisms responsible for the rancidity of Huangjiu[J]. South China Agriculture, 2020, 14(12): 123−124.]

[22] BULLÉ RÊGO E S, SANTOS D L, HERNÁNDEZ-MACEDO M L, et al. Methods for the prevention and control of microbial spoilage and undesirable compounds in wine manufacturing[J]. Process Biochemistry, 2022, 121: 276−285.

[23] PERPETUINI G, ROSSETTI A P, BATTISTELLI N, et al. Adhesion properties, biofilm forming potential, and susceptibility to disinfectants of contaminant wine yeasts[J]. Microorganisms, 2021, 9(3): 654.

[24] 汪建国, 汪琦. 黄酒非生物混浊的原因及解决办法[J]. 中国酿造, 2006, 25(8): 57−59. [WANG Jianguo, WANG Qi. Causes and solutions of abiotic turbidity in Huangjiu[J]. China Brewing, 2006, 25(8): 57−59.]

[25] 陈珊. 黄酒澄清新技术开发及非生物稳定性研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015. [CHEN Shan. Development of new technology for clarification of Huangjiu and research on abiotic stability[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015.]

[26] 魏桃英. 提高黄酒稳定性新工艺研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2014. [WEI Taoying. Research on new process to improve the stability of Huangjiu[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2014.]

[27] SNYDER A B, MARTIN N, WIEDMANN M. Microbial food spoilage: Impact, causative agents and control strategies[J]. Nature Reviews Microbiology, 2024, 22(9): 528−542.

[28] 章志超, 吴鑫, 朱应飞. 导致黄酒酸败的食果糖乳杆菌的分离、鉴定及其检测条件优化[J]. 食品科学, 2018, 39(20): 161−166. [ZHANG Zhichao, WU Xin, ZHU Yingfei. Isolation and identifi-

cation of *Lactobacillus* fructosus-eating bacteria causing Huangjiu rancidity and optimization of their detection conditions[J]. Food Science, 2018, 39(20): 161−166.]
[29] 刘文容, 陈双, 徐岩. 黄酒贮存酸败关键微生物的分离鉴定[J]. 微生物学通报, 2018, 45(1): 120−128. [LIU Wenrong, CHEN Shuang, XU Yan. Isolation and identification of microorganisms critical for Huangjiu storage rancidity[J]. Microbiology China, 2018, 45(1): 120−128.]
[30] SUZUKI K, ASANO S, IIJIMA K, et al. Sake and beer spoilage lactic acid bacteria: A review[J]. Journal of the Institute of Brewing, 2008, 114(3): 209−223.
[31] 章银珠, 姚卫蓉. 变质传统发酵陈化黄酒微生物的分离和鉴定[J]. 中国酿造, 2008, 27(11): 62−66. [ZHANG Yinzhu, YAO Weirong. Isolation and identification of microorganisms from spoiled traditional fermented aged Huangjiu[J]. China Brewing, 2008, 27(11): 62−66.]
[32] 毛青钟. 黄酒发酵醪中特有乳酸杆菌检测和培养基的研究及初步鉴定[J]. 酿酒, 2014, 41(4): 75−80. [MAO Qingzhong. Chinese rice wine mash fermentation of lactic acid bacteria detection and unique media research and preliminary identification[J]. Liquor Making, 2014, 41(4): 75−80.]
[33] 罗雪, 柯锋, 刘文容, 等. 黄酒贮存陈酿关键酸败微生物的生物学特征[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(23): 106−111. [LUO Xue, KE Feng, LIU Wenrong, et al. Biological characteristics of spoilage microbes in the storage of Huangjiu[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(23): 106−111.]
[34] ZHENG J H, WITTOUCK S, SALVETTI E, et al. A taxonomic note on the genus *Lactobacillus*: Description of 23 novel Genera, emended description of the genus *Lactobacillus* Beijerinck 1901, and union of *Lactobacillaceae* and *Leuconostocaceae*[J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2020, 70(4): 2782−2858.
[35] RAPOSO A, PÉREZ E, DE FARIA C T, et al. Food spoilage by *Pseudomonas* spp. —An overview[M/OL]. New York: John Wiley & Sons, 2016: 41-71[2025-01-13]. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9781119139188.ch3.
[36] FANELLI F, CAPUTO L, QUINTIERI L. Phenotypic and genomic characterization of *Pseudomonas putida* ITEM 17297 spoiler of fresh vegetables: Focus on biofilm and antibiotic resistance interaction[J]. Current Research in Food Science, 2021, 4: 74−82.
[37] MAICAS S. The role of yeasts in fermentation processes[J]. Microorganisms, 2020, 8(8): 1142.
[38] HU Jian, LIU Shuangping, LIU Caixia, et al. Component and microbial community structure change of Huangjiu undergoing rancidification during pottery jar storage[J]. CyTA - Journal of Food, 2023, 21(1): 293−301.
[39] 中华人民共和国卫生部. GB 2758-2012 食品安全国家标准发酵酒及其配制酒[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013. [Ministry of Health of the People's Republic of China. GB 2758-2012 National food safety standard brewed wine and compound wine[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.]
[40] 谢广发, 周建弟, 胡志明, 等. 瓶装黄酒酒脚成分的测定[J]. 酿酒科技, 2002(6): 80. [XIE Guangfa, ZHOU Jiandi, HU Zhiming, et al. Determination of the components of foot of bottled Huangjiu[J]. Liquor-Making Science and Technology, 2002(6): 80.]
[41] 杨国军, 俞关松, 尉冬青. 黄酒中蛋白质分布及含量与酒质稳定性关系的研究[J]. 中国酿造, 2005, 24(10): 47−49. [YANG Guojun, YU Guansong, YU Dongqing. Study on the relationship between protein distribution and content and wine stability in Huangjiu[J]. China Brewing, 2005, 24(10): 47−49.]
[42] 齐小慧. 麦曲蛋白的降解及其对黄酒浑浊影响的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2019. [QI X H. Degradation of wheat curd protein and its effect on turbidity of Huangjiu[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019.]
[43] LEIPER K A, STEWART G G, MCKEOWN I P. Beer polypeptides and silica gel part I. polypeptides involved in haze formation[J]. Journal of the Institute of Brewing, 2003, 109(1): 57−72.
[44] 王文蒙. α-淀粉酶抑制剂的提取、分离及性质研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2010. [WANG Wenmeng. Extraction, isolation and characterization of α-amylase inhibitors[D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2010.]
[45] 胡建刚, 刘镇, 周建弟, 等. 液相色谱-串联质谱法同时测定黄酒中 20 种多酚含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(2): 217−225. [HU Jiangang, LIU Zhen, ZHOU Jiandi, et al. Simultaneous determination of 20 polyphenols in Huangjiu by liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(2): 217−225.]
[46] VANBENEDEN N, GILS F, DELVAUX F, et al. Formation of 4-vinyl and 4-ethyl derivatives from hydroxycinnamic acids: Occurrence of volatile phenolic flavour compounds in beer and distribution of Pad1-activity among brewing yeasts[J]. Food Chemistry, 2008, 107(1): 221−230.
[47] BAXTER N J, LILLEY T H, HASLAM E, et al. Multiple interactions between polyphenols and a salivary proline-rich protein repeat result in complexation and precipitation[J]. Biochemistry, 1997, 36(18): 5566−5577.
[48] ADRAR N S, MADANI K, ADRAR S. Impact of the inhibition of proteins activities and the chemical aspect of polyphenols-proteins interactions[J]. Pharma Nutrition, 2019, 7: 100142.
[49] JONGBERG S, ANDERSEN M L, LUND M N. Covalent protein-polyphenol bonding as initial steps of haze formation in beer[J]. Journal of the American Society of Brewing Chemists, 2020, 78(2): 153−164.
[50] YANG Chen, WANG Bingyi, WANG Jianming, et al. Effect of pyrogallic acid (1, 2, 3-benzenetriol) polyphenol-protein covalent conjugation reaction degree on structure and antioxidant properties of pumpkin (*Cucurbita* sp.) seed protein isolate[J]. LWT, 2019, 109: 443−449.
[51] SUN X H, SARTESHNIZI R A, UDENIGWE C C. Recent advances in protein–polyphenol interactions focusing on structural properties related to antioxidant activities[J]. Current Opinion in Food Science, 2022, 45: 100840.
[52] KIM W, WANG Y, SELOMULYA C. Emerging technologies to improve plant protein functionality with protein-polyphenol interactions[J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 147: 104469.
[53] FENG Yulin, JIN Chengming, LÜ Shihao, et al. Molecular mechanisms and applications of polyphenol-protein complexes with antioxidant properties: A review[J]. Antioxidants, 2023, 12(8): 1577.
[54] ZENG Yujun, MAO Shuifang, HUANG Boyu, et al. Formation of tannic acid-binding ovalbumin amyloid fibril hydrogels: Enhanced antibacterial and antioxidant properties[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 156: 110333.
[55] LE BOURVELLEC C, RENARD C M G C. Interactions between polyphenols and macromolecules: Quantification methods and

mechanisms[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2012, 52(3): 213−248.
[56] ZHENG Yuxue, TIAN Jinhu, YANG Wenhan, et al. Inhibition mechanism of ferulic acid against α-amylase and α-glucosidase [J]. Food Chemistry, 2020, 317: 126346.
[57] SAHIHI M, HEIDARI-KOHOLI Z, BORDBAR A K. The interaction of polyphenol flavonoids with β-lactoglobulin: Molecular docking and molecular dynamics simulation studies[J]. Journal of Macromolecular Science, Part B, 2012, 51(12): 2311−2323.
[58] XUE Hongkun, FENG Junyao, TANG Yingqi, et al. Research progress on the interaction of the polyphenol–protein–polysaccharide ternary systems[J]. Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 2024, 11(1): 95.
[59] SIEBERT K J, CARRASCO A, LYNN P Y. Formation of protein−Polyphenol haze in beverages[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1996, 44(8): 1997−2005.
[60] SIEBERT K J, LYNN P Y. Mechanisms of adsorbent action in beverage stabilization[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1997, 45(11): 4275−4280.
[61] 白少勇. 黄酒中蛋白质的沉淀机理与处理方法的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005. [BAI Shaoyong. Study on the precipitation mechanism and treatment method of protein in Huangjiu[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.]
[62] ZEUSCHNER P, PAHL R. Iodine values in the brewery[J]. Brauwelt, 2017, 157(10): 262−264.
[63] STEINER E, BECKER T, GASTL M. Turbidity and haze formation in beer: Insights and overview[J]. Journal of the Institute of Brewing, 2010, 116(4): 360−368.
[64] ZHAO Yue, WANG Xu, LI Dan, et al. Effect of anionic polysaccharides on conformational changes and antioxidant properties of protein-polyphenol binary covalently-linked complexes[J]. Process Biochemistry, 2020, 89: 89−97.
[65] JIN Bei, ZHOU Xiaosong, LIU Yuan, et al. Physicochemical stability and antioxidant activity of soy protein/pectin/tea polyphenol ternary nanoparticles obtained by photocatalysis[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 116: 1−7.
[66] MO Huanping, LI Qiyong, LIANG Jiaru, et al. Investigation of physical stability of Pickering emulsion based on soy protein/β-glucan/coumarin ternary complexes under subcritical water condition[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2021, 56(10): 5017−5024.
[67] WANG Lijun, ZHAO Shan, LIAO Tianyu, et al. Polysaccharide selection and mechanism for prevention of protein–polyphenol haze formation in beverages[J]. Journal of Food Science, 2020, 85(11): 3776−3785.
[68] 李国龙, 金一鸣. 黄酒非生物混浊的研究进展[J]. 酿酒, 2013(1): 34−37. [LI Guolong, JIN Yiming. Progress in the study of abiotic turbidity in Huangjiu[J]. Liquor Making, 2013(1): 34−37.]
[69] 邹慧君, 林峰, 白少勇, 等. 黄酒的氧化沉淀机理研究[J]. 中国酿造, 2005, 24(10): 23−25. [ZOU Huijun, LIN Feng, BAI Shaoyong, et al. Study on the oxidative precipitation mechanism of Huangjiu[J]. China Brewing, 2005, 24(10): 23−25.]
[70] MEDINA-PLAZA C, DUBOIS A, TOMASINO E, et al. Effect of storing conditions (lighting, temperature and bottle color) on rosé wine attributes[J]. Food Chemistry, 2024, 439: 138032.
[71] 赖樱花, 李勇波, 成坚. 黄酒浑浊沉淀问题研究进展[J]. 中国食物与营养, 2011, 17(4): 44−47. [LAI Yinghua, LI Yongbo, CHENG Jian. Progress in the study of turbidity and precipitation of Huangjiu[J]. Food and Nutrition in China, 2011, 17(4): 44−47.]
[72] 谢广发, 沈斌, 胡志明, 等. 黄酒中的另一种沉淀: 草酸钙沉淀[J]. 酿酒, 2011, 38(3): 26−28. [XIE Guangfa, SHEN Bin, HU Zhiming, et al. Calcium oxalate precipitation, another type of precipitation in Huangjiu[J]. Liquor Making, 2011, 38(3): 26−28.]
[73] 陈村元, 欧阳健明. 温度变化对草酸钙晶体生长的影响[J]. 人工晶体学报, 2006, 35(2): 310−314. [CHEN Cunyuan, OUYANG Jianming. Effect of temperature variation on the growth of calcium oxalate crystals[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2006, 35(2): 310−314.]
[74] 张婧靖, 王启慧, 赵港国, 等. 基于响应面法优化高粱黍米黄酒的糖化工艺[J]. 中国调味品, 2025, 50(2): 141−147. [ZHANG Jingjing, WANG Qihui, ZHAO Gangguo, et al. Optimisation of the saccharification process of sorghum millet Huangjiu based on response surface methodology[J]. China Condiment, 2025, 50(2): 141−147.]
[75] 吕美. 黄酒发酵过程酸败预测及相关参数检测技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015. [LÜ Mei. Prediction of rancidity in Huangjiu fermentation process and detection technology of related parameters[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.]
[76] 余莉, 高瑞杰, 汪晗, 等. 复合酵母菌发酵对黄酒品质的影响[J]. 中国酿造, 2024, 43(10): 186−193. [YU Li, GAO Ruijie, WANG Han, et al. Effect of complex yeast fermentation on the quality of Huangjiu[J]. China Brewing, 2024, 43(10): 186−193.]
[77] 刘双平, 赵泽素, 刘海坡, 等. 避光保存条件下影响红曲酒色价稳定的因素[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(5): 109−115. [LIU Shuangping, ZHAO Zesu, LIU Haipo, et al. Factors affecting the color stability of Hong Qu glutinous rice wine stored in dark condition[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(5): 109−115.]
[78] 曾俊鹏, 邹古月, 阮亮, 等. 不同工艺和配方陶瓷酒瓶对白酒、黄酒品质的影响[J]. 中国食品学报, 2020, 20(6): 234−245. [ZENG Junpeng, ZOU Guyue, RUAN Liang, et al. The effect of different processes and formulations of ceramic wine bottles on the quality of Baijiu and Huangjiu[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2020, 20(6): 234−245.]
[79] 杨勤桃, 农接亮, 解庆林, 等. 改性硅藻土在污水处理中的应用研究进展[J]. 化工新型材料, 2022, 50(1): 298−302. [YANG Qintao, NONG Jieliang, XIE Qinglin, et al. Progress of research on the application of modified diatomaceous earth in wastewater treatment[J]. New Chemical Materials, 2022, 50(1): 298−302.]
[80] 刘格, 彭云磊, 汤尚文. 硅藻土助滤对黄酒澄清度及成分的影响[J]. 现代农业科技, 2015(12): 269−269,273. [LIU Ge, PENG Yunlei, TANG Shangwen. Effect of diatomaceous earth filtration aid on clarification and composition of Huangjiu[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2015(12): 269−269,273.]
[81] GÓMEZ J, GIL M L A, DELA ROSA-FOX N, et al. Formation of siliceous sediments in brandy after diatomite filtration[J]. Food Chemistry, 2015, 170: 84−89.
[82] 罗勇, 黄箭, 谢正敏, 等. 白酒中硅藻土助滤剂金属离子迁移量探讨[J]. 酿酒科技, 2020(8): 103−107. [LUO Yong, HUANG Jian, XIE Zhengmin, et al. Migration of metal elements in diatomite filter aid for Baijiu production[J]. Liquor-Making Science & Technology, 2020(8): 103−107.]
[83] 程斐, 单之初, 俞红波, 等. 硅藻土中金属元素含量对黄酒浑浊影响的研究[J]. 酿酒科技, 2023(5): 97−100. [CHENG Fei, SHAN Zhichu, YU Hongbo, et al. Study on the effect of metal element content in diatomaceous earth on the turbidity of yellow wine [J]. Liquor-Making Science & Technology, 2023(5): 97−100.]

［84］ MAGALHÃES L J R, FERREIRA D M, RAMOS-GAVILÁN A B. Enhancing concrete sustainability with spent diatomaceous earth from the wine industry: Long-term experimental and statistical analysis[J]. Structural Concrete, 2025, 26(2): 2277−2295.
［85］ CUPERUS F P, NIJHUIS H H. Applications of membrane technology to food processing[J]. Trends in Food Science & Technology, 1993, 4(9): 277−282.
［86］ 朱建航, 帅桂兰, 赵光鳌, 等. 微滤技术提高黄酒胶体稳定性的探讨[J]. 工业微生物, 1999(3): 33−35. ［ZHU Jianhang, SHUAI Guilan, ZHAO Guang'ao, et al. Discussion on microfiltration technology to improve the colloidal stability of Huangjiu[J]. Industrial Microbiology, 1999(3): 33−35.］
［87］ 郭晓明, 鲁旺旺, 焦艳丽, 等. 超滤技术提高客家黄酒非生物稳定性研究[J]. 中国酿造, 2011, 30(8): 65−67. ［GUO Xiaoming, LU Wangwang, JIAO Yanli, et al. Improving the non-biological stability of *Hakka* rice wine by ultrafiltration technology[J]. China Brewing, 2011, 30(8): 65−67.］
［88］ 杨文芳. 不同分子量超滤膜在黄酒澄清中的应用研究[J]. 中国食品, 2024(16): 158−161. ［YANG Wenfang. Application of ultrafiltration membranes with different molecular weights in the clarification of Huangjiu[J]. China Food, 2024(16): 158−161.］
［89］ 王旨越, 王兰, 周志磊, 等. 超滤膜孔径对瓶装黄酒储藏稳定性和风味的影响[J]. 食品工业科技, 2026, 47(1): 72−83. ［WANG Z Y, WANG L, ZHOU Z L, et al. Effect of ultrafiltration membrane pore size on storage stability and flavour of bottled yellow wine[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(1): 72−83. 120217.］
［90］ 李猷, 朱正军, 谢逾群, 等. 纯碳化硅超滤膜在黄酒冷杀菌工艺中的应用[J]. 酿酒, 2018, 45(4): 56−59. ［LI You, ZHU Zhengjun, XIE Yuqun, et al. Application of pure silicon carbide ultrafiltration membrane in the cold sterilization process of Huangjiu[J]. Liquor Making, 2018, 45(4): 56−59.］
［91］ 彭金龙, 张辉, 毛严根. 膜处理技术在黄酒行业中的应用研究进展[J]. 酿酒科技, 2024(10): 123−127. ［PENG Jinlong, ZHANG Hui, MAO Yangen. Progress in the application of membrane treatment technology in Huangjiu industry[J]. Liquor-Making Science & Technology, 2024(10): 123−127.］
［92］ 高恩丽, 帅桂兰, 赵光鳌, 等. 黄酒中的冷混浊和氧化混浊[J]. 酿酒, 2001, 28(2): 46−47. ［GAO Enli, SHUAI Guilan, ZHAO Guang'ao, et al. Cold and oxidative turbidity in Huangjiu[J]. Liquor Making, 2001, 28(2): 46−47.］
［93］ 艾欢秀, 李强, 刘雅, 等. 冷冻过滤机处理技术在浓香型白酒中的应用与研究[J]. 酿酒, 2025, 52(1): 128−131. ［AI Huanxiu, LI Qiang, LIU Ya, et al. Application and research of freeze-filter processing technology in strong-flavoured white wine[J]. Liquor Making, 2025, 52(1): 128−131.］
［94］ 孙国昌, 边鉴新, 夏杭锋, 等. 快速冷冻过滤技术在黄酒生产中的应用研究[J]. 酿酒科技, 2022(5): 77−79,85. ［SUN Guochang, BIAN Jianxin, XIA Hangfeng, et al. Research on the application of rapid freeze filtration technology in the production of Huangjiu[J]. Liquor-Making Science & Technology, 2022(5): 77−79,85.］
［95］ SUN Yining, YUAN Pengqiang, LIU Guoliang, et al. Analysis of the effects of post-fermentation freezing treatment on the flavor characteristics of beibinghong ice wine by HPLC and HS-GC-IMS[J]. Foods, 2025, 14(9): 1631.
［96］ 李昀哲, 李涛, 张军, 等. 不同澄清剂对石榴酒功能性及香气成分的影响[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(3): 324−332. ［LI Yunzhe, LI Tao, ZHANG Jun, et al. Effects of different clarifiers on functionality and aroma composition of pomegranate wine[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(3): 324−332.］
［97］ 樊世英, 孙军勇, 谢广发, 等. 澄清剂对黄酒混浊蛋白去除效果的研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(8): 167−170. ［FAN Shiying, SUN Junyong, XIE Guangfa, et al. Study on the effect of clarifying agent on the removal of turbid protein in Huangjiu[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(8): 167−170.］
［98］ 朱强, 夏艳秋, 陈静. 黄酒除浊剂的筛选及除浊条件的研究[J]. 酿酒, 2004, 31(4): 93−94. ［ZHU Qiang, XIA Yanqiu, CHEN Jing. Screen on clearer of rice wine and study on condition of clearing[J]. Liquor Making, 2004, 31(4): 93−94.］
［99］ KRÓLAK K, KOBUS K, KORDIALIK-BOGACKA E. Effects on beer colloidal stability of full-scale brewing with adjuncts, enzymes, and finings[J]. European Food Research and Technology, 2023, 249(1): 47−53.
［100］ CANALEJO D, MARTÍNEZ-LAPUENTE L, AYESTARÁN B, et al. Potential use of grape and wine polysaccharide extracts as fining agents to modulate the volatile composition of *Viura* wines[J]. Food Chemistry, 2024, 430: 137047.
［101］ LIU Zhaolong, XU Le, WANG Jun, et al. Research progress of protein haze in white wines[J]. Food Science and Human Wellness, 2023, 12(5): 1427−1438.
［102］ 赖樱花, 成坚, 李勇波, 等. 酸性蛋白酶对黄酒常规质量指标的影响[J]. 食品科技, 2012, 37(3): 135−138. ［LAI Yinghua, CHENG Jian, LI Yongbo, et al. Effect of acidic protease on quality of regular indices in yellow rice wine brewing[J]. Food Science and Technology, 2012, 37(3): 135−138.］
［103］ SHELDON R A, VAN PELT S. Enzyme immobilisation in biocatalysis: Why, what and how[J]. Chemical Society Reviews, 2013, 42(15): 6223−6235.
［104］ KHARAZMI S, TAHERI-KAFRANI A. Bi-enzymatic nanobiocatalyst based on immobilization of xylanase and pectinase onto functionalized magnetic nanoparticles for efficient fruit juice clarification[J]. LWT, 2023, 183: 114914.
［105］ PAUP V D, APLIN J J, POTTER R I, et al. Sensory properties of 6- and 18-month-stored wines made with pectinase-producing non-*Saccharomyces* yeasts[J]. Journal of Food Science, 2023, 88(1): 462−476.
［106］ 高轶岚, 高丽芳, 方洁. 黄酒在一定区间温度下净含量值的计算方法研究[J]. 酿酒, 2023, 50(6): 114−115. ［GAO Yilan, GAO Lifang, FANG Jie. Study on the change rules of net content of bottled Huangjiu at a certain temperature range[J]. Liquor Making, 2023, 50(6): 114−115.］
［107］ 刘克, 张清文, 毛严根. 冷热灌装方式对黄酒风味物质的影响[J]. 酿酒科技, 2019(8): 69−71. ［LIU Ke, ZHANG Qingwen, MAO Yangen. Effect of hot and cold filling methods on flavour substances of Huangjiu[J]. Liquor-Making Science & Technology, 2019(8): 69−71.］
［108］ DHAR R, BASAK S, CHAKRABORTY S. Pasteurization of fruit juices by pulsed light treatment: A review on the microbial safety, enzymatic stability, and kinetic approach to process design[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2022, 21(1): 499−540.
［109］ DEL SOCORRO C N, RAMÍREZ-MORENO E, LEÓN-RIVERA J E, et al. Shelf life, physicochemical, microbiological and antioxidant properties of purple *Cactus* pear (*Opuntia Ficus* Indica) juice after thermoultrasound treatment[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2015, 27: 277−286.
［110］ SILVA F V M, VAN WYK S. Emerging non-thermal tech-

nologies as alternative to SO_2 for the production of wine[J]. Foods, 2021, 10(9): 2175.

[111] YE Lingzhen, HUANG Lu, HUANG Yuqing, et al. Haze activity of different barley trypsin inhibitors of the chloroform/methanol type (BTI-CMe)[J]. Food Chemistry, 2014, 165: 175−180.

[112] ALTPETER F, SPRINGER N M, BARTLEY L E, et al. Advancing crop transformation in the era of genome editing[J]. The Plant Cell, 2016, 28(7): 1510−1520.

[113] XIE Guangfa, HAN Jiongping, HAN Xueyuan, et al. Identification of colloidal haze protein in Chinese rice wine (Shaoxing Huangjiu) mainly by matrix-assisted laser ionization time-of-flight mass spectrometry[J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(8): 4027−4036.

[114] YANG Qi, DONG Yi, QIU Yong, et al. Design of functional magnetic nanocomposites for bioseparation[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2020, 191: 111014.

[115] MIERCZYNSKA-VASILEV A, BOYER P, VASILEV K, et al. A novel technology for the rapid, selective, magnetic removal of pathogenesis-related proteins from wines[J]. Food Chemistry, 2017, 232: 508−514.